

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平8-51246

(43)公開日 平成8年(1996)2月20日

(51)Int.Cl. ^a	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
H 0 1 S	3/11			
G 0 2 F	1/35			
H 0 1 S	3/098			

審査請求 未請求 請求項の数27 O L (全 11 頁)

(21)出願番号	特願平6-317040	(71)出願人	593185670 イムラ アメリカ インコーポレイテッド アメリカ合衆国 ミシガン州48105 アン アーバー ウッドリッジ・アベニュー1044
(22)出願日	平成6年(1994)12月20日	(71)出願人	594131326 ミシガン ユニバーシティー アメリカ合衆国 ミシガン州48109 アン アーバー ウォルバリン・タワー2071- 1280
(31)優先権主張番号	08/169707	(74)代理人	弁理士 大川 宏
(32)優先日	1993年12月20日		
(33)優先権主張国	米国 (U S)		

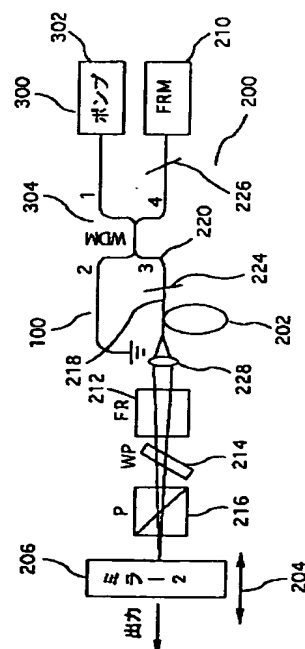
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 環境変化に対して安定な受動型モードロック・レーザー

(57)【要約】

【目的】 本発明は環境変化に対して安定な受動型モードロック・レーザーに関するもので、特に一定の反復率を有する超短パルスを発生するものである。

【構成】 本発明のキャビティはキャビティ内のエネルギーを増幅するための利得媒体と、利得媒体を通過する光軸に沿ってエネルギーを反射する反射手段を備えている。環境の変化に対する影響を受けにくい特徴は、キャビティおよび利得媒体中の線形の位相変動を補償するための補償手段を含むことにより達成される。本発明の好ましい実施例として、温度変化の影響を受けず、また、圧力変化の影響が無視し得る程度の受動型モードロック・レーザーが開示されている。本発明では数メートル程度の適当なファイバー長さ（理論的には1ミリメートル程度から数キロメートルの範囲でも可能である）で超短パルスが発生できるので、非常に低コストで実施でき、様々な用途に対して極めて実用的である。



1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 レーザーエネルギーを発生するためのエネルギー発生手段を備え、

前記エネルギー発生手段はキャビティを備え、

前記キャビティは、前記キャビティ内のレーザーエネルギーを増幅するための利得媒体、

前記利得媒体を通過する光軸に沿ってレーザーエネルギーを反射する反射手段、

前記利得媒体の線形の位相変動補償手段、および前記キャビティ内に発生したレーザーエネルギーを出力するための出力手段、を含む受動型モードロック・レーザー。

【請求項2】 前記位相変動補償手段は、さらに、前記キャビティ内で発生された偏光を制御するための制御手段を含む請求項1記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項3】 前記制御手段は、さらに、第一ファラデー回転子、および、第二ファラデー回転子を含み、前記第一および第二ファラデー回転子は共に、前記キャビティ内に配置されており、前記第一および第二のファラデー回転子の間がキャビティ内領域となる請求項2記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項4】 前記エネルギー反射手段は、前記キャビティの第一端に配置された第一キャビティミラーと、前記第一端の反対側に位置する第二端に配置された第二キャビティミラーを含み、前記第二キャビティミラーはファラデー回転子を含む請求項1記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項5】 前記キャビティは、さらに、高複屈折ファイバーと、前記キャビティの前記光軸に沿ってレーザーエネルギーを伝達するために前記高複屈折ファイバーに接続された低複屈折ファイバーを含む請求項1記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項6】 前記利得媒体は高複屈折ファイバーを含む請求項5記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項7】 前記キャビティは、さらに、前記キャビティのレーザーエネルギーの線形偏光を変換するための変換手段を含む請求項1記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項8】 前記線形偏光変換手段は、前記光軸に沿って配置され、線形の位相遅れを発生させる波長板を含む請求項7記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項9】 前記光軸に沿って配置された偏光子を備える請求項8記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項10】 前記キャビティは、さらに、前記光軸に沿って発生したレーザーエネルギーを集中させるためのエネルギー集中手段を含む請求項3記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項11】 前記レーザーエネルギー出力手段は、さらに、前記キャビティからレーザーエネルギーを放射するための出力カブラを含み、前記出力カブラは前記エネルギー反射手段の第一キャビティミラーである請求項1

2

記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項12】 前記レーザーエネルギー発生手段にエネルギーを注入するためのポンプ手段を備え、前記ポンプ手段は、さらに、エネルギー源と、前記ポンプ手段を前記キャビティに結合するための波長分割多重カブラを含む請求項1記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項13】 前記波長分割多重カブラは低複屈折ファイバーを含む請求項12記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項14】 前記利得媒体は高複屈折ファイバーで、かつ、希土類元素がドーブ処理されたファイバーである請求項1記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項15】 前記希土ドーブファイバーは適当な長さを有する請求項14記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項16】 前記キャビティが線形キャビティである請求項1記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項17】 前記出力手段は、さらに、前記キャビティからのレーザー光の出力カップリングのための偏光ビームスプリッターとファイバー絶縁子を備える請求項1記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項18】 前記位相変動補償手段は、前記光軸に沿って偏光を回転させる少なくとも一つのファラデー回転子を含み、前記ファラデー回転子は前記レーザーエネルギー出力手段である出力カブラとしても機能する請求項1記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項19】 レーザーのモードロックを開始するための飽和吸収体を備え、前記飽和吸収体は基板上に形成された半導体である請求項1記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項20】 レーザーのモードロックを開始するためのファイバー伸張器を備えた請求項1記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項21】 レーザーのモードロックを開始するための移動可能なミラーを備えた請求項1記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項22】 レーザーエネルギーを発生するためのエネルギー発生手段を備え、前記エネルギー発生手段はキャビティを有し、前記キャビティは、さらに、低複屈折ファイバー、および、前記キャビティ内を伝播するレーザーエネルギーが通過する光軸に沿って前記低複屈折ファイバーに接続された高複屈折ファイバーを含む受動型モードロック・レーザー。

【請求項23】 前記エネルギー発生手段は超短パルスを発生するためのファイバーレーザーである請求項22記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項24】 レーザーエネルギーを発生するためのエネルギー発生手段を備え、前記エネルギー発生手段はキャビティを有し、前記キャビティは、前記キャビティの光軸に沿ってレー

3

レーザーエネルギーを増幅するための利得媒体、
前記利得媒体を通過する光軸に沿ってレーザーエネルギーを反射する反射手段、
前記キャビティの光軸に沿ってレーザーエネルギーの線形偏光を変換する手段、
前記利得媒体の光軸に沿って線形の位相変動を補償する補償手段、および、
前記キャビティ中の前記利得媒体で発生したレーザーエネルギーを出力するための出力手段、
を含む受動型モードロック・レーザー。

【請求項25】前記キャビティは、さらに、少なくともファラデー回転子を使用して前記キャビティ内で発生した偏光を制御するための制御手段を含む請求項24記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項26】前記線形偏光変換手段は、前記光軸に沿った線形の位相遅れを発生させるための少なくとも一つの波長板を含む請求項25記載の受動型モードロック・レーザー。

【請求項27】前記キャビティの光軸に沿って偏光子が配置されている請求項26記載の受動型モードロック・レーザー。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明はレーザーエネルギーを増幅するための装置と方法に関するものであり、特に高い安定性を供え、超短パルスを供給し得る環境変化に対して安定な受動型モードロック・レーザーに関係するものである。

【0002】

【従来の技術】能動型モードロック・レーザーと受動型モードロック・レーザーは両者ともレーザー技術の分野でよく知られているものである。例えば、単一モード希土ドープ処理ファイバーを使用したモードロック・レーザーは小型の超短パルス源を形成し得る。特に有効なファイバーパルス源として、カータイプ(Kerr-Type)受動型モードロック技術がある。このパルス源は、標準的で入手容易なファイバーレーザー用の部品を用いて組み立てることができ、また、希土ドープ処理ファイバーレーザーの帯域幅の限界であるギガヘルツ台の反復率を伴うパルスを供給できる。

【0003】ファイバーレーザー技術に基づく超短パルス源が真に実用的であるためには、環境変化に対して高い安定性を持つことが要求される。本発明において「環境変化に対して安定が高い」ということは、パルス源が、例えば温度変化といったような、環境的な影響を受けた場合でもパルス発生が途切れないことを意味し、また、圧力変化に対しても殆ど影響を受けないことを意味する。これに対して従来のファイバーレーザー技術に基づく超短パルス源は、温度変化および圧力変化の両方の影響を受けやすく、パルス発生を保持するためにオペレ

4

ーターが断続的に監視および調整を行う必然がある。

【0004】超短パルス源のキャビティの環境安定性を改善するために、偏光を保持したエルビウムドープ処理ファイバー中におけるカータイプ・モードロックが提案された。その一例として、Fermann 博士らがオブティクス・レター誌に発表した「偏光を保持したエルビウムドープ処理ファイバーにおける非線形偏光発生(Nonlinear Polarization Evolution)を利用した受動型モードロック("Passive Mode Locking By Using Nonlinear Polarization Evolution In A Polarization-Maintaining Erbium-Doped Fiber", Fermann, M.E. et al., OPTICS LETTERS/Vol. 18, No. 11, June 1, 1993, Pp. 894-896)」が上げられる。この論文は、偏光を保持したエルビウムドープ処理ファイバーの二つの線形偏光された基本固有モードの差動励起(A Differential Excitation)を含むカータイプ・モードロックを開示している。二つの基本固有モードは一定の伝播距離を経た後の非線形な位相遅れの差分を蓄積する。偏光子における固有モードの干渉により非線形な位相遅れは振幅変調に変換され、一往復ごとに受動型モードロックを達成するために十分なパルス短縮が得られる。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、そのような受動型モードロックは大きな問題点を持っている。例えば、振幅変調は干渉しあう二つの固有モード間での線形の位相遅れの影響も受ける。偏光が保持されたエルビウムドープ処理ファイバーの中で線形の位相遅れは温度変化や圧力変化の影響を受けるので、安定したモードロック動作を確実にするために常時調整可能な位相制御が必然となる。

【0006】超短パルス源キャビティの不安定に着目したもう一つの試みは、「8字型レーザー(Figure-8 Laser)」と呼ばれるカータイプ・モードロックを使用したものである。8字型レーザーは1993年にケンブリッジで行われたオブティカルソサエティ・オブ・アメリカの非線形導波現象についての時事会議でTaverner博士らにより発表された「8字型レーザーを用いた偏光制御("Polarization Maintaining Figure-8 Laser")」という論文(レポート番号: WC No. 3)に説明されている。この論文は、カータイプ・モードロックを用いて偏光を保持するファイバーレーザーにおける振幅変調を開示している。この論文に記載されているように、偏光を保持する8字型レーザーの逆特性のために、すなわち8字型レーザーは干渉しあう二つの偏光方向に沿った線形位相遅れが常にゼロであることにより、位相制御器の使用が避けられている。

【0007】しかしながら、開示された8字型レーザーには問題がある。例えば、受動型位相変調は振幅に変換されるが、変換効率が非常に悪い。キャビティ内に受動型モードロックを発生させるために、非常に長い偏光

保持ファイバーが必要(300メートル以上)とされ、このために、8字型レーザーによって発生されたパルスは持続時間が比較的長い(2ピコ秒以上)。さらに、パルスが比較的小さなパルスエネルギー(1.0ピコジュール未満)で発生され、8字型レーザーが安定する範囲は比較的小さな範囲に制限される。キャビティには高複屈折ファイバーが使われているためファイバー部品間の高精度な接続が要求され、そのためレーザー装置が複雑化し、また、コストも高くなる。

【0008】カータイプ・モードロック・ファイバーレーザーのキャビティ内において干渉しあう二つの固有モード間の位相遅れ(または、このケースではファイバーの偏光固有モード間の位相遅れ)が環境変化に影響されやすい点を克服することに着目した試みは、「単偏光ファイバー増幅器("Single-Polarisation Fibre Amplifier", Electronics Letters, June 4, 1992, Vol. 28, No. 12)」と題され、最近公開されたDuling博士とEsnam博士の論文に開示されている。この論文の中で、ファイバー増幅器の出力の偏光状態が環境変化の影響を受けないようにするために偏光子と共にファラデー回転ミラー210が使用されている。前述したように、幾つかの理由のために、この技術はカータイプ・モードロック・ファイバーレーザーの実用化に適していない。

1) 一往復を経た後、偏光固有モード間の線形位相遅れが完全にゼロになるように補償されていないし、調整することもできない。2) 一往復を経た後、ファラデー回転ミラー210が偏光状態を90度回転させるが、このことはレーザー発振の開始を妨げ、偏光子における信号光の完全な損失をもたらす。3) この単純な方法では、モードロック・ファイバーレーザーとして必要な、非線形偏光発生が制御されない。

【0009】以上に述べたように、環境の変化に対して安定した超短パルス源として、オペレーターの入力や持続的な位相制御を必要とせず、安定性が保てることが望ましい。さらに、商業的に実用的で、例えば通信環境での使用に適した超短パルス源を提供するために、コスト効率の良い方法でこのようなパルス源を提供することが望ましい。

【0010】本発明は超短パルス源を環境変化に対して安定なものとするを課題とする。

【0011】

【課題を解決するための手段】前述した課題を達成するために本発明の受動型モードロック・レーザーは、レーザーエネルギーを発生するエネルギー発生手段と、レーザーエネルギーを注入する注入手段を備える。前記レーザーエネルギー発生手段はキャビティを含む。前記キャビティはキャビティ内のレーザーエネルギーを増幅するための利得媒体、利得媒体を通過する光軸に沿ってレーザーエネルギーを反射する反射手段、キャビティ内に発生したレーザーエネルギーを出力する出力手段

を含んでいる。前記キャビティは、さらに、ファイバーの偏光固有モード間における線形の位相変動を補償するための少なくとも一つのファラデー回転子、および、キャビティ内のエネルギーの線形偏光を変換するための変換手段をそなえる事ができる。また、偏光を保持しないファイバー部品はキャビティの構造を単純化するため、また、組立コストを低減するためにキャビティの中に含めることができる。

【0012】

【作用及び発明の効果】本発明によれば、余分な位相制御器を用いるオペレーターの監視および調整は必要ない。1~2メートル程度の長さを有するファイバーが使用できるため、商業的に実用的なコスト効率の良い構造で超短パルスを発生できる。能動型の複雑な変調技術を必要とせず、しかも他の既知の受動型技術に一般的に見られる不安定さもなく比較的高い反復率が達成できる。

【0013】

【実施例】本実施例は受動型モードロック超短パルス源に関するもので、温度変化の影響を受けず、圧力変化に対して殆ど無視できる程度にわずかな感度がある受動型モードロック超短パルス源に関するものである。さらに、本実施例は、商業的に実用的な効率の良い方法で実施することができる。

【0014】図1の実施例において、環境変化に対して安定した線形位相遅れがカータイプ・モードロック・ファイバーレーザーの干渉しあう二つの偏光固有モードの間で得られる。図1の実施例で、受動型モードロック・レーザー100はレーザーキャビティ200を含む。キャビティ200は、例えばファブリーペローキャビティ(Fabry-Perot Cavity)であり得る。受動型モードロック・レーザー100はさらに、レーザーエネルギーを注入するポンプ手段300を含む。

【0015】図1の実施例で、レーザーキャビティ200は、キャビティ200の中でエネルギーを増幅するための利得媒体202を含む。利得媒体202は、光の増幅作用(すなわち利得)が得られるものであればよく、あらゆる種類の希土ドープ処理ファイバーになり得る。本実施例では、利得媒体202としてエルビウムイオンをドープ処理したアクティブファイバーを用いている。しかしながら、当業者であればネオジムイオンでドープ処理されたファイバーのような、その他の希土ドープファイバーが使用可能であることは容易に理解できるであろう。さらに、当発明はファイバーレーザーだけに限定されず、その他のタイプのレーザーにも適用できる。例えばバルク半導体材料を利得媒体202として用いたバルク半導体レーザーや半導体レーザーと共に使用することが可能である。光学的または電氣的ポンプが使用可能であるが、光学的ポンプは一般的にバルク半導体レーザーの使用が望ましく、電氣的ポンプは半導体レーザーの使用が好ましい。

【0016】レーザーキャビティ200は、さらに利得媒体202を通る光軸204に沿って配置されたエネルギー反射手段を含む。エネルギー反射手段はキャビティ200の第一端に位置したキャビティミラー206を含む。キャビティミラー206はキャビティ200内で信号光を反射する、キャビティミラー206は容易に入手可能で当業者の間で良く知られている一般的なレーザーミラーで良い。

【0017】また、本実施例において、キャビティミラー206はレーザーエネルギー出力手段としてもレーザーキャビティ200の内部へ反射して戻し、残部を通過させて出力エネルギーにするという二つの機能を果たす。しかし、当業者であれば、キャビティミラー206を出力カプラ手段と反射手段に分離することが可能であることは容易に理解できるだろう。

【0018】図1の実施例はカータイプ・モードロックファイバーレーザーの干渉し合う二つの偏光方向を含む。これらの干渉し合う偏光方向は、高複屈折ファイバー (Highly-Birefringent Fiber) の二つの線形偏光固有モードを含む。利得媒体202として使用されるエルビウムドープ処理ファイバーは高複屈折ファイバーとなり得る。

【0019】干渉し合う偏光方向は、図2を参照することによってより良く理解し得る。図2は利得媒体202における高複屈折エルビウムドープ処理ファイバーの断面203を示す。図2の座標系においては干渉し合う二つの偏光方向がx軸およびy軸で示されている。本発明では、図1のキャビティ200は、低複屈折ファイバー (Low-Birefringent Fiber) も含む得る。本実施例においてキャビティ200の中で使用される低複屈折ファイバー220の長さは、高複屈折ファイバーの長さとは比較的 (8倍から10倍程度) 短い。高複屈折ファイバーには非線形のパルス整形作用があるが、低複屈折ファイバーでは、そのようなパルス整形作用はごくわずかである。

【0020】キャビティ200内で高複屈折パルス整形作用と低複屈折パルス整形作用の両方を用いることにより、非偏光保持カブラーはレーザーキャビティ200への光の入出力を行うためのカブラとして使用することができる。このような特徴はレーザーのアセンブリとパッケージを単純にし、全体のコストを顕著に低減し得る。

【0021】本発明のレーザーキャビティ200はさらに利得媒体202の線形位相変動を補償するための補償手段を含んでいる。位相変動補償手段はキャビティ200の中で発生した偏光した光を制御するための装置を少なくとも一つ含む、それにより利得媒体202の線形位相変動を補償する。例えば、ファラデー回転ミラー210は位相変動を補償するための既知の装置で、入射する光の偏光を90度回転させて反射する。従って、位相変

動補償手段はエルビウムドープ処理ファイバーのような利得媒体202の偏光固有モード間の線形位相変動を補償するためのファラデー回転ミラー210を少なくとも一つ含む。

【0022】本実施例において、位相変動補償手段は、反射手段の第二キャビティミラーとして機能するファラデー回転ミラー210を流用することによってレーザーキャビティ200の二つの偏光固有モード間の線形位相変動をなくす。ファラデー回転ミラー210は偏光を45度回転させる回転子を含み、入射光に対して反射光の偏光面を90度回転させる。従って、反射光は、精密に偏光状態で利得媒体202へ戻される。

【0023】ファラデー回転ミラー210および後述するファラデー回転子212によりファイバーの偏光固有モード間の線形位相遅れの総和は一往復の後ちょうど0 (ゼロ) になる。ファラデー回転ミラー210により反射された後、非線形の位相変化は高複屈折ファイバーの偏光固有モードに沿って補償されないまま残り、蓄積される。高複屈折ファイバーがランダムなモード結合を排除すること、および、低複屈折ファイバーの長さが比較的短いことにより、非線形の位相変化は偏光固有モードの相対的なパワーによって支配され、環境的な影響を受けにくい。

【0024】また、ファラデー回転ミラー210は、さらにパルス発生の開始を改善するためにレーザーキャビティ200内の空間的なホールバーニング (Spatial Hole-Burning) を排除する。ファラデー回転ミラー210は、キャビティ200の全長にわたり比較的一定の強度を有する90度回転した第二の偏光方向を発生する。さらに、ファラデー回転ミラー200は、キャビティ内ファイバー (すなわち、キャビティ200内で利得媒体202を含むファイバー) の両端部からのスプリアス後方反射 (Spurious Back-Reflections) を抑圧し、同時に連続波レーザーの背景を排除する。例えば、ファラデー回転ミラー210で反射する拡散光はミラー内で回転され、偏光子216によって吸収される。

【0025】ファラデー回転ミラー210は、さらに、高複屈折ファイバーにおいて顕著になり得る偏光固有モードの群速度の外れ (Walk-Off) を補償する。当業者であれば、偏光保持ファイバーの異なる屈折率がファイバーの他軸 (すなわちy軸) に比べてある軸 (すなわちx軸) に沿ってより速い光の伝播を発生させることは容易に理解し得るであろう。

【0026】キャビティ200内で光が一往復する毎に、光信号のパルスは拡散し続ける。しかし、ファラデー回転ミラー210は、光信号が反射する毎に光信号を90度回転させ、そのような群速度の外れを禁止する。この結果、一往復の間に拡散した光信号のパルスが次の一往復の間に互いにより近くなる。ファラデー回転ミラー210は、レーザーキャビティ200中で、偏光固有

モード間の群速度の外れが最大になる位置に配置することができる。このように、低複屈折ファイバーの不必要な非線形性を最小限にすることによりファラデー回転ミラー210の前のファイバー部品の非線形性が低減され得る。これらの特徴を与えられ、本発明に基づく環境的に安定した動作は、比較的長い低複屈折ファイバーを用いて達成され得る。

【0027】位相変動補償手段は、さらに、第二ファラデー回転子212を含み得る。本実施例においては、ファラデー回転ミラー210の偏光回転を補償するために第二ファラデー回転子212はキャビティ200の中央に配置し得る45度のファラデー回転子である。位相変動補償手段は環境変化に対する安定性をもたらすが、モードロックを最適化する目的で偏光の変換が非線形の偏光発生のために必要である。このアクションは、例えば線形位相遅れを発生するためのキャビティ200内に含まれた一つまたは複数のバルク波長板214といった、エネルギーの線形偏光を変換するための変換手段を含むことにより行われる。また、図1のキャビティ200は偏光子216を含んでいる。偏光固有モード間の干渉はキャビティ200内の偏光子216において発生する。偏光子216はどのような種類の偏光素子でもよい。

【0028】波長板214により引き起こされる偏光の変化は板214の傾きや回転に依存する。単一の波長板*

$$R(P) = f(\alpha, \Psi, \phi_{01}(\alpha, \Psi, P)) \dots (1)$$

ここにおいて、 $f(\alpha, \Psi, \phi_{01}(\alpha, \Psi, P))$ は、 $\alpha, \Psi, \phi_{01}(\alpha, \Psi, P)$ の関数であり、 $\phi_{01}(\alpha, \Psi, P)$ は、キャビティ内出力Pの関数として、高複屈折ファイバーの偏光固有モード間で蓄積された非線形の位相遅れの微分値である。非線形反射 $R(P)$ の範囲は0と1の間である。

【0031】キャビティ内出力Pの増加に伴って非線形反射 $R(P)$ が増加するとき、受動型モードロックが得られる。図1の受動型モードロック・レーザーはさらにレーザーポンプ手段300を含む。ポンプ手段300は、一般的にポンプ302として示されるエネルギー源（電子的または光学的エネルギー源など）を含む。図1の実施例においては、エルビウムファイバーが利得媒体202として使用されており、ポンプ302は光学的なポンプであり得る。

【0032】波長分割多重カブラ304によりポンプ手段300がキャビティ200に連結される。波長分割多重カブラ304は、信号光を損失することなくキャビティ200にエネルギーが注入できるものであれば、すなわちポンプ302と信号光の差動結合ができるものであれば、どのようなものでもよい。本実施例においては、ポンプ302は980ナノメートルの波長幅でエネルギーを作り出すことができ、波長分割多重カブラ304は980ナノメートルポンプと1550ナノメートル信号に適合するアスター社製波長分割多重カブラ1550/

*の使用は光の拡散を最小限にするが、二枚の波長板の使用は楕円偏光した光の偏平率と回転角度の個別制御を可能にする。一枚または複数枚の波長板、または、任意の偏光変成器により引き起こされる偏光の変化は、偏光子216の偏光軸に関して考慮される。利得媒体202のエルビウムドーブ処理ファイバーは偏光子216に関するどの軸に対しても配列できる。そして偏光の変換は、その全体系により個別に決定される。すなわち、偏光変成器線形は偏光子216から抜け出した偏光した光を偏平率 Ψ を有する楕円偏光した光に変換し、この結果、楕円はファイバーのx軸に関し角度 α だけ回転される。ここで Ψ の正接 (Tangent) は b/a であり、 b と a は偏光楕円体の短軸と長軸である。

【0029】このポアンカレ球(Poincare Sphere: この分野では周知) に関して偏光変換を表現すると、 $(0, 0) \rightarrow (2\Psi, 2\alpha)$ となる。二つのファラデー回転素子210、212が存在することにより、非線形の反射 $R(P)$ が、この偏光変換（すなわち、 Ψ と α の値）により、キャビティ200内でのキャビティ内出力Pの関数として完全に定義される。キャビティミラー206の効果的な非線形反射 $R(P)$ は以下の数式により定義される。

【0030】

980 (AsterWDM 1550/980) になり得る。

【0033】本実施例では、第一ファラデー回転ミラー210と波長分割多重カブラ304は低複屈折ファイバーを含む。しかしながら、当業者であれば、このような構成が一例にすぎないことを容易に理解し得るであろう。本実施例の重要な特徴の一つは、キャビティ200内の高複屈折ファイバーの長さが低複屈折ファイバーの部分と比較して比較的長いということである。

【0034】図1に示した本実施例では、高複屈折ファイバー部分は、高複屈折ファイバーの偏光固有モードの出力量が完全に一定になるように、利得媒体202のキャビティ内ファイバーの一端（すなわち、第一レンズ228に隣接した部分）、または、端部にできるだけ近い部分で始まる。実施例において、波長分割多重カブラ304と高複屈折ファイバー218は融合スプライス (Fusion Splices) を用いることにより、相互に接続し得る。

【0035】さらに、図1に示した実施例は光軸204に沿って発生するエネルギーを集束するエネルギー集束手段を含む。図1のエネルギー集束手段は、少なくとも、利得媒体202から入射したエネルギーを第一キャビティミラー206へ収束し、エネルギーを第一キャビティミラー206から利得媒体202へ導くための第一レンズ228を含む。第一レンズ228は利得媒体202から入射する光を収束し得るものであれば、どのよう

な光学素子でも良い。本実施例においては、第一キャビティミラー206上における出力密度が最大になるように、第一レンズ228の焦点が第一キャビティミラー206上に位置する必要がある。同様に、第一レンズ228の焦点は、利得媒体202上における出力密度が最大になるように、利得媒体202上に位置する必要がある。

【0036】本実施例のキャビティ200では、2.6メートルの高複屈折ファイバーが0.6メートルの標準通信用(Standard Communications-Type)低複屈折ファイバーと共に使用された。この高複屈折ファイバーは、1.567ミクロン(μm)のレーザー波長で10センチメートル偏光うなり長(Polarization Beat length)があった。この高複屈折ファイバーは28ミクロンの有効なコアエリア(Core Area)を有し、開口数(Numerical Aperture)は0.19だった。高複屈折ファイバーは、およそ 5×10^{18} エルビウムイオン/ cm^3 でドープ処理された。

【0037】図1の実施例のレーザーシステムの構造は単なる一例であり、当業者であれば、本発明の下で種々の別の実施例を容易に考えられるであろう。例えば、図1の全体構造は裏返すことができ、ファラデー回転ミラー210がキャビティ200の左側に、そしてキャビティミラー206がキャビティ200の右側に位置するように置き換えることができる。

【0038】本発明では、ファラデー回転ミラー210とファラデー回転子212の正確な位置は、当業者であれば極めて容易に決められる。しかしながら、本実施例では、ファラデー回転ミラー210とファラデー回転子212は全てのファイバー(すなわち高複屈折及び低複屈折ファイバー)が位置するキャビティ200のキャビティ内部分を定義する。

【0039】さらに当業者であれば、別の実施例として、非偏光保持低複屈折ファイバー220がレンズ228と利得媒体202の間に配置し得ることは容易に考えられるであろう。そのような実施例では、エルビウムドープ処理高複屈折ファイバーは波長分割多重カプラ304、および/または、ファラデー回転ミラー210内に含め得る。さらにまた、当業者であれば、キャビティ200の内部における低複屈折ファイバーと高複屈折ファイバーの相対的な長さにより様々な実施例が考えられると言うことを理解し得るであろう。同様に、群速度の散乱量が相違するファイバーの断面は発振パルスのエネルギーを最大にするために連鎖し得る。

【0040】本実施例によれば、80%反射キャビティミラー206、およびARコート処理された(Anti-Reflection Coated)プリズム偏光子216が使用し得る。また、4ミリメートルの開口を有するARコート処理された45度ファラデー回転子212、およびARコート処理されたクォーツ・ゼロ次波長板(Quartz Zero-Order

r Waveplate)214が使用し得る。波長板214は光学的に接触した3ミリメートルの厚さを有する。高複屈折ファイバー218に接触したキャビティ内にファイバーの一端は10度の角度で切断されており、ARコート処理される必要はない。モードロック処理のために、また、光軸204に沿った並進運動のために、移動可能なキャビティミラー206が本実施例中で用いられている。

【0041】図1の実施例では、360フェムト秒程度、または、それ以下のパルスが約60ピコジュール程度の含有エネルギーを伴って発生できる。例えば、 $\pm 7\%$ のポンプの出力変動は、例えば持続波レーザー光(すなわち、完全にモードロックされていないレーザー出力)の発生時や多重パルスの開始時のような不安定さを発生させることはない。

【0042】安定したモードロックは、(波長板214の光軸に沿った)位相 δ (Single-Pass Phase Along The Axis Of The Waveplate)がおよそ130度、 α がおよそ10度の模範値において得られる。一度、波長板214と偏光子216が設定されれば追加調整は必要なく、永久に固定し得る。本実施例では、レーザーは低複屈折ファイバーの振動に敏感でなく、波長に比べて振動周期が長いとき、高複屈折ファイバーの振動を許容する。強い振動が与えられ(例えばファイバーに強いねじりを与える時)、モードロックが失われた時でさえ、一度解放されるとファイバーは元の位置とモードロック特性にもどる。さらに、本実施例は、キャビティ200内の残留反射に対して敏感ではない。

【0043】さらに、連続波が含まれないクリーンな単パルスがキャビティ200内に発生するモードロックの閾値は、例えば、70ミリワット(波長分割多重カプラ304の前で計測)のポンプ出力レベルよりも50%高くし得る。別の実施例においては、モードロックの閾値は、ARコート処理されたキャビティ内のファイバーの一端を含むことによって低減し得る。

【0044】図3Aと図3Bは、安定範囲の末端におけるパルススペクトルを示している。ポンプ出力が増加するにつれ、また、キャビティ長あたりのソリトン周期が増加し、対応する分散性波(A Dispersive Wave)へのエネルギー放射が増加するに連れて、パルスが短くなり、スペクトル幅が広がる(スペクトル共鳴の高さの増加により示される通り)。

【0045】図4にパルスの典型的な自己相関軌跡(Autocorrelation Trace)を示す。発生したパルスは指数関数的に減少するパルス波形の(すなわち、 sech^2)およそ0.30の時間帯域値の積(A Time-Bandwidth Product)を有する360フェムト秒のFWHM幅(Full Width at Half-Maximum Width)で、低レベルのバックグラウンド・ノイズ(Background Noise)の影響を受けにくい。パルスの反復率が27メガヘルツの際、出力カプラの後

ろで計測した平均パルスエネルギーは10ピコジュールであった。偏光子により拒絶された光を用いた際、60ピコジュール以上のパルスエネルギーは拡散可能であることに注意してほしい。これらの値は55ピコジュールの平均キャビティ内パルスエネルギーに変換され、標準的な非偏光保持カータイプ・モードロック・ファイバーレーザーと比較し得る一往復あたり約1.1 π の非線形位相遅れを生じる。

【0046】当業者であれば、本発明の代替実施例を思いつくことは容易であろう。すでに説明した代替実施例に加えて、様々な基礎レーザーキャビティが使用し得ることは言うまでもない。例えば、本実施例では偏光子、波長板、ファラデー回転子、キャビティミラー、レンズ、および、バルク素子 (Bulk Components) が使用されているが、同様な作用を得るために、これらに代えてねじ曲げ素子 (Pigtailed Components) を使用し得る。

【0047】また、レーザーエネルギーを出力するために別のキャビティ設計を行い得る。図5に示した第二実施例において、キャビティ200は、容易に入手可能な、ねじ曲げ全ファイバー偏光子 (Pigtailed All-Fiber Polarizer)、又はねじ曲げ偏光ビームスプリッター (Pigtailed Polarization Beam Splitter) 502を含み、さらに、容易に入手可能な二つのファイバー・コリメーター504を含む。出力カップリングが全ファイバー偏光子または偏光ビームスプリッター502で得られ、付加的なファイバー絶縁子 (Fiber Isolators) 506がファイバー出力からの望ましくない逆反射を抑制するために使用し得る。

【0048】図6に示した第三実施例において、キャビティ200は、偏光子における出力カブラの代わりに、ファラデー回転ミラー210における出力カブラ、または、ファイバー絶縁子602を通る付加的なファイバー出力カブラ603を含む。図7に示した第四実施例において、キャビティ200は、モードロック・プロセスを開始するための半導体飽和吸収体702又はファイバー伸張器704を含む。この特徴により、モードロック・プロセスを開始するために必要なキャビティミラー206の位置調節を省略し得る。

【0049】飽和吸収体702は、キャビティ200によって発生するレーザー波長の周辺にバンド端を有するものであれば、基板上に形成されたあらゆる種類の半導体飽和吸収体になり得る。しかし、後述の説明では、AlInAsバリアとGaInAsウエルに基づく多重量子ウエル (Multiple Quantum Well) 飽和吸収体を例に上げて説明する。低レベルのバックグラウンド・ノイズの影響を受けることなく確実に良質なパルスを発生させるため、飽和吸収体702の飽和エネルギーはファイバーレーザーのソリトンエネルギーに適合させることができ、キャビティ200の全長はソリトン周期に適合させ得る。

【0050】本発明の別の実施例では、飽和吸収体702は主要なモードロック素子として使用し得る。この場合、高複屈折ファイバーを用いる必要はなく、キャビティ200は全て非偏光保持ファイバーで形成し得る。この場合、ファラデー素子210と212はキャビティ200内の偏光状態を安定させる目的でのみ使用される。

【0051】前述の実施例が本発明の顕著な特徴を示すことに対し、当業者であれば本発明の代替実施例が容易に考えられることは明らかであろう。例えば、図1の実施例で説明されているレンズ228は、約10マイクロメートル以下のビーム径を有する一点レーザーエネルギーを集中させることができる。しかし、好ましい精度は設計者によって選ばれる。さらに、図1に示した実施例ではレンズ228が、様々な部品の内部接続のために使われているが、当業者であればファイバーへの直接結合を行うことによりレンズ228が除去し得ることは明らかだろう。逆に、もし必要であれば複数のレンズを用いて結合することも可能である。さらに、図7の実施例において、単一の飽和吸収体702が示されているが、もし必要であれば一つ以上の飽和吸収体を使用し得る。

【0052】本実施例では、ポンプ302の出力は400ミリワット程度であるが、もちろんそれ以上にもし得る。しかし一般にポンプ302の出力は1ワット以下である場合が多い。例えば、ポンプ302は1.55マイクロメートルの信号波長が発生する980ナノメートルチタニウム・サファイヤ・レーザー源になりうる。波長分割多重カブラ304の入出力リード (または入出力ポート) には1から4までの数字が記載されたラベルが貼られており、リード1はポンプ302に接続され、リード3は利得媒体202を通して出力カブラへ導かれる。また、出力リード2は疑似反射を減らすために一定角度で剪断されており、リード4はファラデー回転ミラー210に接続されている。

【0053】例えば、波長分割多重カブラ304としては、二つの入力リードと二つの出力リードを持つ、アスター社製波長分割多重カブラが使用できる。レーザー光はポンプ302に接続された入力リード1から入射し、利得媒体202を通して出力カブラへ導かれる。利得媒体 (エルビウムファイバー等) 202からファラデー回転ミラー210へ入射した光は、ファラデー回転ミラー210で反射され、波長分割多重カブラ304を通過して波長分割多重カブラ304の入力リード3へ出力される。もちろん、波長分割多重カブラ304の接続は本実施例だけに限定されず、様々な接続が考えられる。その一例として、図6の実施例では波長分割多重カブラ304のリード4が出力カブラに接続されている。

【0054】図1に示したレーザー100は、連続モード、あるいは、パルス発振モードで動作可能である。典型的なファイバーレーザーは、1ワット以下のパワー入力に対して1~50ミリワット程度の出力パワーを発生

する。キャビティ200は付加的な要素として例えばエタロン (Etalons) や複屈折調整板 (Birefringent Tuning Plates) のような帯域幅を限定する要素を含むことができ、これらの要素はレーザー出力の波長調整のために利用できる。また、ファイバーの偏光固有モードの群速度が外れる場合、または、ファイバーの偏光固有モード間にソリトントラップ (Soliton Trapping) が発生する場合、キャビティ200はソリトン整形プロセス (Soliton Shaping) または非ソリトン整形プロセス (No Soliton Shaping) を含み得る。これらのプロセスは同時に、または、あらゆる組み合わせにおいて有効で、パルス形成を安定させ得る。

【0055】以上、環境の変化に対して安定な干渉しあう偏光固有モード間における位相遅れを有するカータイプ・モードロック・ファイバーレーザーの使用に関する本発明の好ましい実施例を説明した。本発明は断続的な位相調整を行うための「調整ダイヤル」なしで動作し得るので、本発明のキャビティ200は実用的で、商業的価値に優れたものである。従って本発明のレーザーは、何の問題もなく完全に密封されたケースの中に納めることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】図1は、本発明の第一実施例に関し、カータイプ・受動型モードロックを使用したエルビウムドープ処理ファイバーレーザーを示すブロック図である。

【図2】図2は、本発明の第一実施例に関し、キャビティの中の偏光発生を説明するための座標系を示すブロック図である。

【図3】図3Aは、レーザーの安定域の両端で得られる

パルススペクトル示すグラフであり、図3Bは、レーザーの安定域の両端で得られるパルススペクトル示すグラフである。

【図4】図4は、発生したパルスの自己相関を示すグラフである。

【図5】図5は、本発明の第二実施例に関する受動型モードロック・レーザーを示すブロック図である。

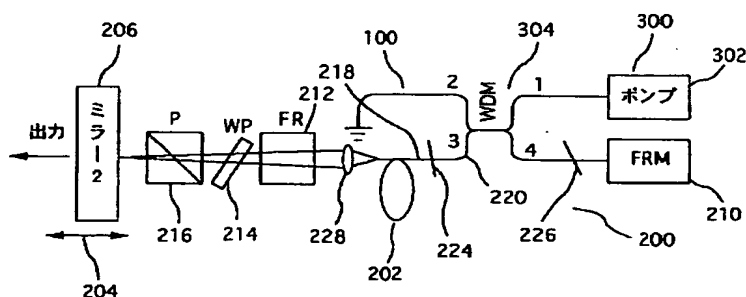
【図6】図6は、本発明の第三実施例に関し、出力カップリングのため、あるいは、ファラデー回転ミラーでの出力カップリングのためにファイバーカブラを追加した例を示すブロック図である。

【図7】図7は、本発明の第四実施例に関し、モードロックを開始させるために飽和吸収体、あるいは、ファイバー伸張器を示すブロック図である。

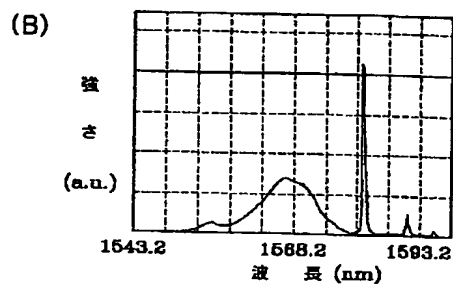
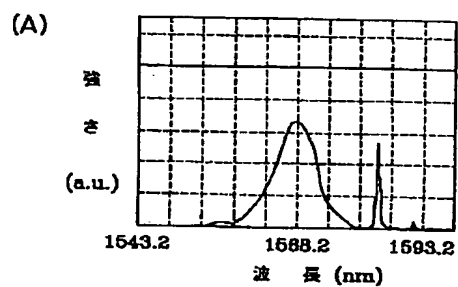
【符号の説明】

100: 受動型モードロック・レーザー	200: レーザーキャビティ
300: ポンプ手段	202: 利得媒体
204: 光軸	206: キャビティミラー
210: ファラデー回転ミラー	212: ファラデー回転子
214: バルク波長板	216: 偏光子
218: 高複屈折ファイバー	220: 低複屈折ファイバー
228: 第一レンズ	

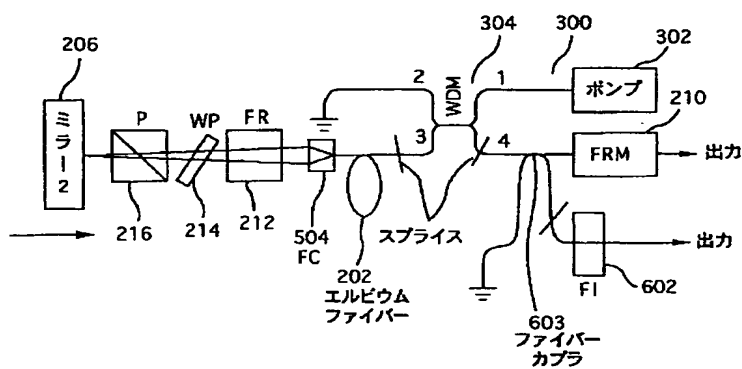
【図1】



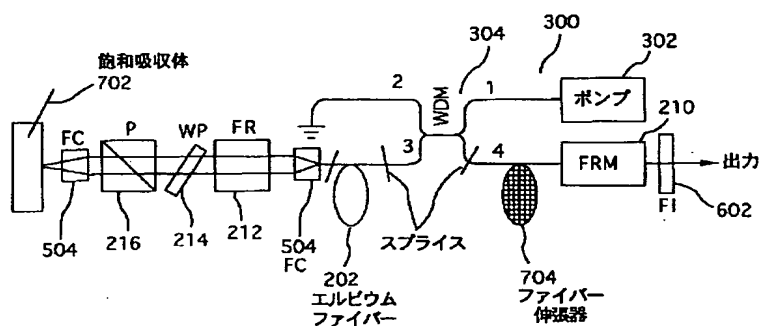
【图3】



【図6】



【図7】



フロントページの続き

(72)発明者 マーチン・イー・ファーマン
 アメリカ合衆国 ミシガン州48105 アン
 アーバー ビレッジグリーン・ブルバード
 322 202

(72)発明者 ドナルド・ジェイ・ハーター
 アメリカ合衆国 ミシガン州48105 アン
 アーバー サルグレイブ・プレイス3535